

Una pietra miliare nell'ulteriore sviluppo del Sistema Internazionale di unità

Il 16 novembre 2018 la Conferenza generale dei pesi e delle misure ha deciso di procedere ad una revisione fondamentale del Sistema Internazionale di unità SI. Un insieme di sette costanti con valori fissi definisce ora il sistema in modo completo e costituisce la base per la definizione delle unità. Tra le altre cose con la revisione l'ultimo artefatto ancora presente nel SI, il chilogrammo prototipo, viene abbandonato e sostituito con un'unità di massa basata su costanti naturali.

BEAT JECKELMANN

In quasi tutti i settori della società moderna, nella scienza e tecnologia, nella produzione industriale e nel commercio e persino nella vita quotidiana, per esprimere i risultati delle misurazioni in forma chiara e comparabile si utilizza il Sistema Internazionale di unità (SI). Con i progressi scientifici e tecnologici anche il SI deve svilupparsi ulteriormente e adattarsi alle esigenze degli utenti. La revisione approvata nel novembre 2018 rappresenta una pietra miliare nell'ulteriore sviluppo del SI. Grazie a questa modifica in futuro i risultati delle misurazioni saranno ancora più coerenti, affidabili e precisi, rendendo quindi possibili nuove scoperte e innovazioni scientifiche.

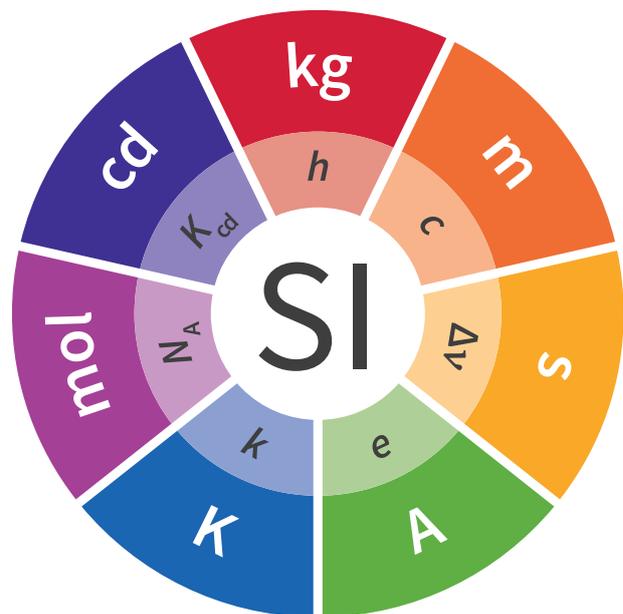
Cosa contraddistingue un sistema di unità?

La scelta di un sistema di unità non è un processo strettamente scientifico. Tale scelta è caratterizzata da considerazioni pratiche, dalla conoscenza delle correlazioni fisiche, ma anche da condizioni storiche di compatibilità e da arbitrarietà. Anche il SI introdotto oggi in tutto il mondo è quindi il risultato di un lungo sviluppo storico. Soprattutto le crescenti esigenze in materia di accuratezza delle misurazioni hanno sempre portato a miglioramenti nelle definizioni delle unità [1]. Un'importante condizione limite per le modifiche è la compatibilità con le versioni precedenti. I risultati delle misurazioni, come ad esempio i dati sul clima, devono essere comparabili su lunghi periodi di tempo. Ciò è possibile solo se le unità utilizzate sono stabili nel tempo e comparabili all'interno delle incertezze.

Nel SI viene fatta una distinzione tra unità di base e unità derivate. I valori delle unità di base, sette al momento, sono fissati arbitrariamente. Le unità derivate sono definite da combinazioni di unità di base in conformità alle relazioni algebriche tra le variabili coinvolte.

Le definizioni delle unità di base, come sono state utilizzate nel corso del tempo, possono essere suddivise in modo semplificato in diverse classi:

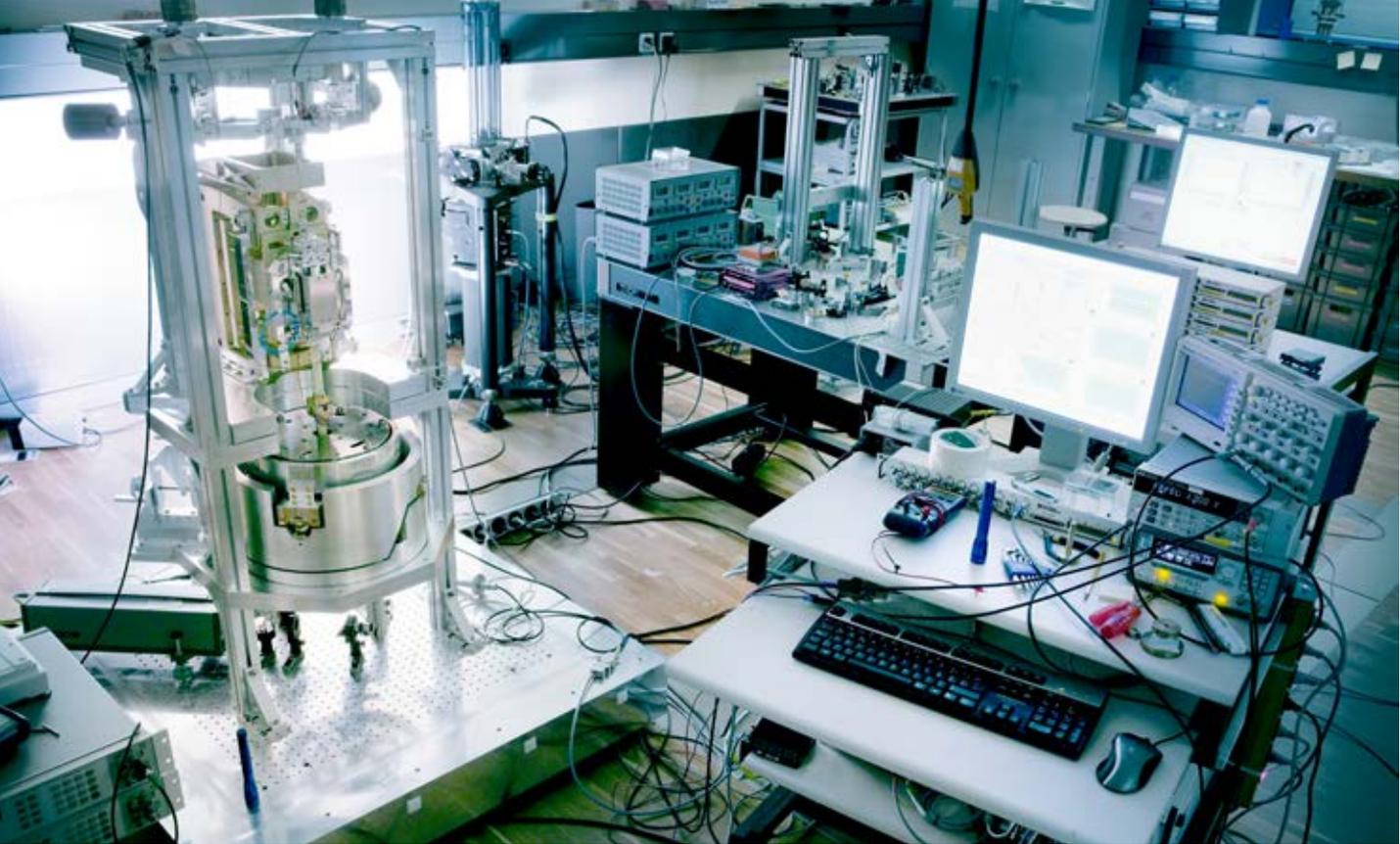
1. Un artefatto idoneo è selezionato come realizzazione dell'unità per la grandezza desiderata. Fino al momento dell'adozione della revisione, nel SI solo il chilogrammo era ancora definito in questo modo: il chilogrammo è la massa del prototipo internazionale del chilogrammo, un cilindro



1: Il SI riveduto: il cerchio interno mostra le 7 costanti da definire. Esse costituiscono gli elementi costitutivi per la realizzazione delle unità sul cerchio esterno. Sono rappresentate le sette unità di base del SI. Dalle combinazioni delle costanti si possono derivare anche tutte le altre unità. Le unità di base e le unità derivate sono equivalenti.

fatto di una lega di platino-iridio conservato presso il BIPM a Parigi. Questa definizione ha ovviamente un carattere locale. L'unità è disponibile solo in un luogo, il BIPM. La diffusione dell'unità avviene mediante confronto con il campione di riferimento primario e la precisione è quindi limitata dalla precisione del metodo di confronto. Poiché il chilogrammo prototipo è un corpo macroscopico con una superficie instabile, l'evoluzione nel tempo dell'unità non è nota con precisione. Questo è il più grande svantaggio della definizione.

2. La realizzazione dell'unità può anche essere fatta sulla base di uno stato fisico idoneo. Il secondo viene ad esempio definito utilizzando la durata della radiazione corrispondente a una transizione atomica nell'atomo di cesio. Per la realizzazione dell'unità di temperatura, il kelvin, prima della revisione ci si basava sul fatto che la temperatura termodinamica dell'acqua nel punto triplo è un valore stabile indipendente da fattori ambientali. Il punto triplo è lo stato in cui tutte le tre fasi dell'acqua, solida, liquida e gassosa, sono in equilibrio.



La bilancia di watt confronta la potenza meccanica ed elettrica e può mettere in relazione la massa con la costante di Planck.

Le realizzazioni di unità basate in questo modo hanno un carattere universale. Ciò significa che le unità sono realizzabili ovunque e in qualsiasi momento. Tutti gli atomi di Cs hanno le stesse proprietà che non cambiano nel tempo. Tuttavia, gli stati non possono essere descritti con sufficiente precisione da un'equazione analitica del modello. Inoltre, la precisione stessa della realizzazione delle unità tramite le proprietà del processo fisico scelto è limitata.

- Infine, le unità possono anche essere basate su costanti. Queste ultime figurano anche come costanti di proporzionalità o punti di connessione quantitativi nelle teorie fisiche. Il loro valore non può essere influenzato e non cambia né nello spazio né nel tempo. Le costanti sono quindi le unità «naturali» e si prestano in modo ideale anche come base per la definizione delle unità SI. Nel precedente SI il metro e l'ampere sono esempi di questa classe di unità. La definizione del metro assegna un valore fisso alla velocità della luce nel vuoto. Nel caso della definizione dell'ampere viene determinata la permeabilità magnetica del vuoto. Le unità di base di questo tipo hanno carattere universale come quelle del tipo 2. Tuttavia, non sono vincolate a determinati stati fisici e ciò consente un miglioramento continuo della realizzazione con il progresso della fisica.

Perché era necessario una revisione?

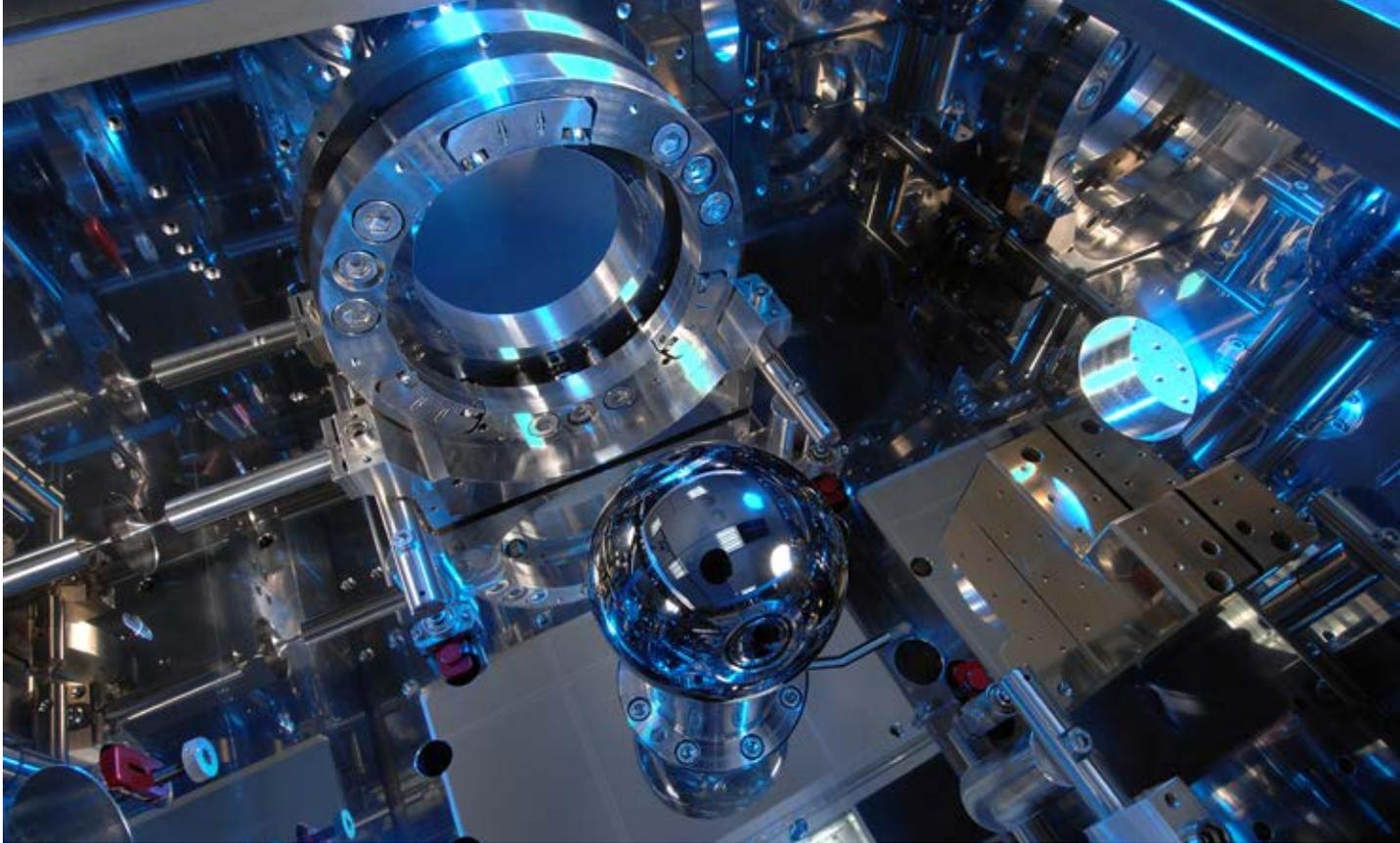
Nel precedente SI il **chilogrammo** era l'ultima unità di base ancora basata su un artefatto. Nella fattispecie il kg era definito come la massa del chilogrammo prototipo. Copie di questo campione primario sono conservate da molti istituti nazionali di metrologia (INM) in tutto il mondo. Dal 1889 queste copie sono state confrontate tre volte con il prototipo internazionale. Successivamente è stata prodotta una serie di copie e una misurazione di confronto con il prototipo è stata effettuata

solo due volte. Per entrambi i gruppi è emerso che rispetto al prototipo internazionale la massa delle copie nazionali in media è aumentata [2] (vedi anche figura 1). La variazione relativa media di circa 50 μg in 100 anni è davvero molto piccola. Ma siccome mediante la definizione dell'ampere le unità elettriche si riferiscono alla forza e quindi al chilogrammo, una deriva del chilogrammo induce una deriva analoga nelle unità elettriche.

La **definizione dell'ampere** combina unità elettriche e meccaniche. Per la realizzazione delle unità elettriche sono necessari complicati esperimenti elettromeccanici (bilancia di Watt, condensatore calcolabile, ...). Nella moderna tecnologia di misurazione elettrica con l'effetto Josephson e l'effetto Hall quantistico vengono realizzati valori di tensione e resistenza molto riproducibili, che conformemente allo stato delle conoscenze dipendono solo da costanti naturali [3][4]. La tensione dello standard di Josephson è inversamente proporzionale alla costante di Josephson $K_J = 2e/h$.

La resistenza di Hall quantizzata è proporzionale alla costante di von Klitzing $R_K = h/e^2$. Lo standard di Josephson e lo standard quantistico sono quindi direttamente riconducibili alla carica elettrica elementare e ed alla costante di Planck h . Nel precedente SI K_J e R_K possono essere determinati con un'incertezza relativa del 10^{-7} . Ciò è circa 100 volte peggiore della riproducibilità degli effetti quantistici in laboratorio. Questa circostanza ha portato al fatto che il 1° gennaio 1990 il Comitato internazionale dei pesi e delle misure ha introdotto i valori K_{J-90} e R_{K-90} stabiliti per convenzione: $K_{J-90} = 483\,597.9 \text{ GHz V}^{-1}$, $R_{K-90} = 25\,812.807 \text{ }\Omega$.

Questo passo ha migliorato drasticamente la coerenza globale delle misurazioni elettriche. D'altra parte, ciò ha condotto praticamente ad un sottosistema nel SI, cosa che da un punto di vista concettuale non è soddisfacente.



Nell'X-Ray Crystal Density Experiment (XRCD), la massa di un atomo di silicio viene misurata con elevata precisione contando gli atomi in un cristallo Si quasi perfetto.

Anche nella misurazione della temperatura la precedente definizione dell'unità di base, il **kelvin**, mediante la cella del punto triplo dell'acqua raggiunge i suoi limiti (tipo 2 secondo la classificazione di cui sopra). La realizzazione è sensibile alle impurità nella cella ed alla composizione isotopica dell'acqua utilizzata. Inoltre, la realizzazione della scala a partire dal punto zero e dal punto triplo è molto complessa.

Requisiti sperimentali per la revisione

Per rimediare alle vulnerabilità identificate, dal lato sperimentale è stato necessario un ampio lavoro su due fronti: la correlazione del kg alla costante di Planck con un'incertezza relativa richiesta dagli specialisti $\leq 2 \times 10^{-8}$ e la determinazione della costante di Boltzmann k con un'incertezza relativa $\leq 10^{-6}$. Il primo problema si è rivelato particolarmente difficile da risolvere.

Sono stati perseguiti due approcci fondamentalmente diversi. Nell'esperimento X Ray Crystal Density (XRCD) la massa di un atomo di silicio viene misurata con elevata precisione «contando» gli atomi in un cristallo di Si quasi perfetto [5]. La massa atomica può a sua volta essere correlata con precisione molto elevata alla costante di Planck h . Pertanto, l'esperimento XRCD offre la possibilità di correlare il chilogrammo alla massa atomica o alla costante di Planck. Un altro approccio sperimentale è la cosiddetta «bilancia di Watt» (denominata anche «bilancia di Kibble» secondo il nome del suo inventore) [6]. Tale bilancia confronta potenze meccaniche ed elettriche. Se la potenza elettrica viene misurata con standard quantistici, la massa può essere correlata alla costante di Planck [5]. Naturalmente, i risultati dei due diversi approcci devono essere coerenti. Per determinare la costante di Boltzmann è disponibile tutta una serie di metodi [7]. Il più preciso è quello del termometro acustico a gas, con cui la costante k è determinata dalla velocità del suono in un gas in funzione della temperatura.

I requisiti di coerenza e precisione nella determinazione della costante di Planck o di quella di Boltzmann e quindi i presupposti per una revisione del SI sono stati soddisfatti nella primavera del 2017.

Un insieme di costanti definisce il sistema

Nelle sezioni precedenti abbiamo visto come la definizione delle unità nel SI si sia sviluppata da una relazione 1 a 1 con un artefatto (chilogrammo prototipo) passando per un riferimento a un sistema o stato fisico (punto triplo dell'acqua per il kelvin) fino ad essere basata su una costante naturale (velocità della luce per il metro). Nell'ultima fase la realizzazione dell'unità si stacca concettualmente dalla definizione. Un'unità definita dal valore fisso di costanti naturali può essere realizzata in conformità alle leggi della fisica secondo lo stato attuale delle conoscenze scientifiche e tecniche. È possibile apportare miglioramenti alla realizzazione senza dover ridefinire l'unità.

Con i progressi conseguiti nella sperimentazione, per la prima volta è ora possibile basare l'intero SI su un set di costanti con valori definiti con precisione. Nel SI abbiamo fatto la scelta di definire il valore di sette unità di base mediante convenzione. Per questo motivo dobbiamo anche definire sette costanti.

Il SI è un sistema pratico, e in questo senso, non è sorprendente che le costanti di cui sopra non abbiano tutte la stessa importanza. Nella fisica moderna la velocità della luce c e la costante di Planck h sono considerate costanti davvero fondamentali. Esse si riferiscono a proprietà generali dello spazio, del tempo ed a processi fisici, che si applicano allo stesso modo a tutti i tipi di particelle e interazioni. La costante di Boltzmann k può essere considerata un fattore di conversione per la temperatura e l'energia. La frequenza $\Delta\nu$ dello splitting iperfine dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133 è la

Il set selezionato delle costanti è il seguente (vedi anche il riquadro 1):

$\Delta\nu_{\text{Cs}}$: frequenza della transizione fra i due livelli iperfini dello stato fondamentale nell'atomo di ^{133}Cs : Questa costante definisce il secondo. La revisione non cambia nulla nella realizzazione pratica dell'unità.

c : velocità della luce nel vuoto: Con c e il secondo realizzato mediante $\Delta\nu$ si può realizzare il metro. Anche in questo caso la revisione non cambia nulla nella pratica.

h : costante di Planck: Insieme a c e $\Delta\nu$ ed agli esperimenti appropriati si riesce a stabilire la correlazione a una massa macroscopica e a procedere quindi alla realizzazione del kg. Questo è il risultato più importante della revisione.

e : carica elementare: Insieme con il secondo viene con ciò ridefinito l'ampere. L'ampere può essere realizzato direttamente attraverso circuiti a singolo elettrone. Il vantaggio della definizione di e risiede però principalmente nel fatto che, fissando la costante di Planck e la carica elementare, sono fissate anche le costanti di Josephson e di von Klitzing. Utilizzando l'effetto Josephson e l'effetto Hall quantistico, nel SI riveduto si può perciò realizzare direttamente il volt o l'ohm. Ciò rende superflue le costanti convenzionali $K_{\text{J}-90}$ e $R_{\text{K}-90}$ e anche il sottosistema pratico.

k : costante di Boltzmann: Insieme a $\Delta\nu$ e h ed a un esperimento primario adeguato (ad es. termometro acustico a gas) si può realizzare il kelvin. Di conseguenza, il valore del punto triplo dell'acqua non è più fissato e ora non è noto esattamente.

N_{A} : numero di Avogadro: Con questa definizione della costante di Avogadro la mole viene definita come la quantità di materia che contiene $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ particelle elementari specificate. La correlazione al kg, come veniva stabilita prima utilizzando la definizione della mole, non è più necessaria. Ciò significa che la massa molare del ^{12}C non ha più un valore fisso, ma non è nota esattamente.

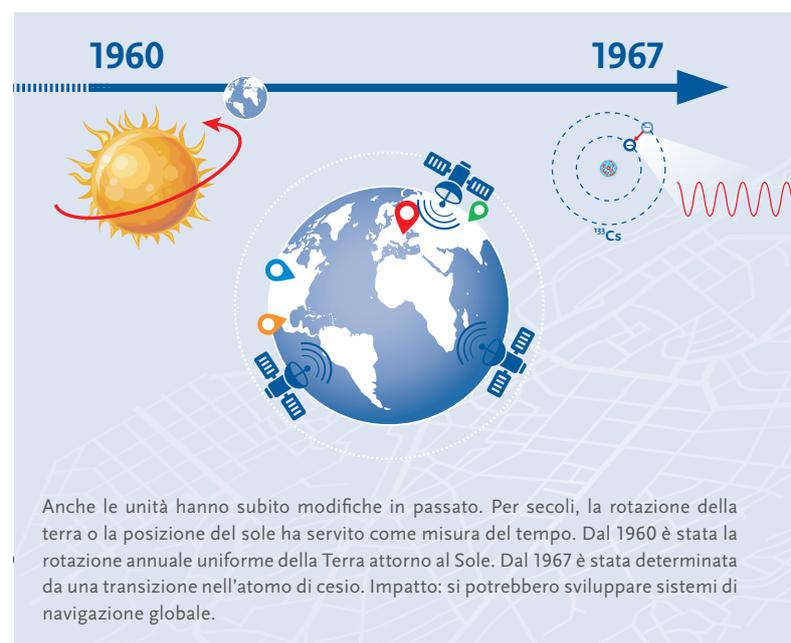
K_{cd} : equivalente fotometrico di una radiazione monocromatica di 540×10^{12} Hz: Con questa determinazione la definizione della candela rimane invariata rispetto a prima.

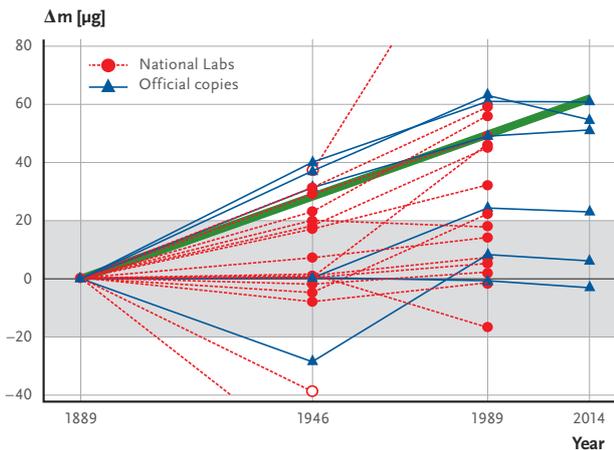
proprietà di un atomo specifico. Essa non può essere espressa più semplicemente utilizzando grandezze «più fondamentali». La precisione della realizzazione dell'unità del secondo, che è correlata a questa costante, è limitata dalla larghezza naturale delle righe spettrali della transizione atomica. Si stanno compiendo sforzi considerevoli per definire l'unità di tempo nel prossimo futuro mediante una costante «più fondamentale». Il numero di Avogadro N_{A} e l'efficienza luminosa K_{cd} sono scelti per motivi pratici; essi non sono normalmente considerati dai fisici come «fondamentali».

Con le costanti fissate e con l'aiuto delle leggi della fisica nel SI si possono realizzare tutte le unità. Le costanti sono gli elementi costitutivi e impostano lo standard per l'intero sistema. Di conseguenza, non è più necessario fare la distinzione tra unità di base e unità derivate. Tutte le unità del SI sono derivate dall'insieme selezionato di sette costanti e sono quindi equivalenti.

Per la definizione delle costanti si è tenuto conto di tutti i risultati sperimentali pubblicati fino alla fine di giugno 2017. Tramite il suo Task Group on Fundamental Constants (TGFC) il Committee on Data for Science and Technology (CODATA) mette periodicamente a disposizione della comunità scientifica e tecnologica un insieme auto-coerente di valori raccomandati a livello internazionale delle costanti fondamentali e dei fattori di conversione per la fisica e la chimica. In virtù di

questo ruolo, la Conferenza generale dei pesi e delle misure ha invitato il CODATA Task Group ad effettuare un calcolo speciale di compensazione per stabilire i valori delle costanti da definire per il SI riveduto. I risultati di tale adeguamento sono elencati nel riquadro a [pagina 14](#) [8], vale a dire i valori





1: Verifica periodica: confronto delle copie nazionali e delle copie ufficiali con il chilogrammo prototipo. I confronti sono stati effettuati al momento dell'introduzione nel 1889, in seguito nel 1946 e nel 1989. Il confronto del 2014 non è una «verifica periodica» ufficiale, poiché era coinvolto solo un sottoinsieme dei campioni di riferimento.

$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ Js}$

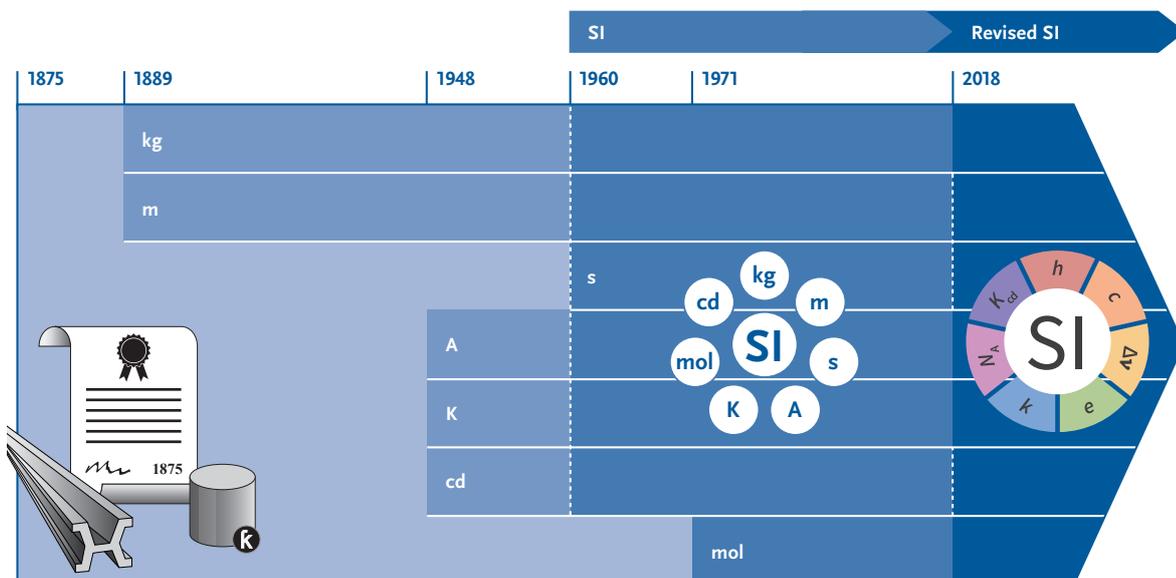
Max Planck era un importante fisico tedesco ed è considerato il fondatore della fisica quantistica. Il kg viene ridefinito utilizzando la costante di Planck.

numerici di h , e , k e N_A , ciascuno con un numero sufficiente di cifre per garantire la coerenza tra il precedente e il SI riveduto. Il prossimo adeguamento periodico CODATA delle costanti fondamentali avrà luogo alla fine del 2018. Tale adeguamento sarà anche straordinario, poiché si baserà per la prima volta sulle costanti definite esattamente del SI riveduto.

Cosa cambia per l'utente?

Il SI riveduto entrerà in vigore il 20 maggio 2019 in occasione della Giornata Mondiale della Metrologia 2019. Sebbene in quel giorno sarà realizzato il cambiamento più fondamentale

dall'introduzione del SI, ciò non avrà un impatto immediato sulla vita quotidiana. Nonostante la nuova definizione, i valori delle unità chilogrammo, kelvin e mole rimangono per il momento invariati. Piccole correzioni sono necessarie solo per le unità elettriche. Con la ridefinizione dell'ampere le unità pratiche definite mediante i valori convenzionali delle costanti di Josephson e di von Klitzing diventano obsolete. Il «ritorno» al SI significa una variazione relativa di 1.07×10^{-7} per misurazioni della tensione e di 1.78×10^{-8} per misurazioni della resistenza. Queste correzioni sono così piccole da essere importanti solo per pochi utenti al di fuori degli INM.



Il sistema metrico e il SI sono sempre stati adattati allo sviluppo della tecnologia e alle sue esigenze. In qualsiasi ridefinizione, è fondamentale mantenere la stabilità a lungo termine dell'SI.

Definizione del SI

Il sistema Internazionale di unità SI è definito dalla determinazione dei valori di 7 costanti. I valori numerici provengono dal calcolo di compensazione di CODATA effettuato nell'estate del 2017.

Frequenza della transizione fra i due livelli iperfini dello stato fondamentale nell'atomo di ^{133}Cs

$$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$$

Velocità della luce nel vuoto

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

Costante di Planck

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s (J s = kg m}^2 \text{ s}^{-1})$$

Carica elementare

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C (C = A s)}$$

Costante di Boltzmann

$$k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ (J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1})$$

Numero di Avogadro

$$N_{\text{A}} = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Equivalente fotometrico di una radiazione monocromatica di $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$

$$K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm W}^{-1}$$

In conclusione

Grazie alla revisione il Sistema Internazionale di unità è pronto per il futuro. È stato progettato in modo tale da rendere possibili migliori realizzazioni delle unità col passare del tempo, senza che ciò venga esplicitamente specificato dal sistema. Il SI dispone quindi di una solida base a lungo termine e rimane il fondamento a livello mondiale per misurazioni con la precisione richiesta dalla società, dall'economia e dalla scienza.

Riferimenti bibliografici

- [1] BIPM, «Measurement units: the SI.» [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/measurement-units/>.
- [2] G. Girard, «International Report: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992),» *Metrologia*, vol. 31, pp. 317–336, 1994.
- [3] B. Jeckelmann and B. Jeanneret, «The quantum Hall effect as an electrical resistance standard,» *Reports Prog. Phys.*, vol. 64, no. 12, pp. 1603–1655, Dec. 2001.
- [4] B. Jeanneret and S. P. Benz, «Application of the Josephson effect in electrical metrology,» *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 172, no. 1, pp. 181–206, Jun. 2009.
- [5] K. Fujii et al., «Realization of the kilogram by the XRCD method,» *Metrologia*, vol. 53, no. 5, pp. A19–A45, 2016.
- [6] I. A. Robinson and S. Schlamming, «The watt or Kibble balance: A technique for implementing the new SI definition of the unit of mass,» *Metrologia*, vol. 53, no. 5, pp. A46–A74, 2016.
- [7] J. Fischer et al., «The Boltzmann project,» *Metrologia*, vol. 55, no. 2, pp. R1–R20, 2018.
- [8] D. Newell et al., «The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_{A} for the revision of the SI,» *Metrologia*, vol. 55, no. 1, pp. L13–L16, 2018.